

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA  
FAKULTA STROJNÍ  
KATEDRA AUTOMATIZAČNÍ TECHNIKY A ŘÍZENÍ

**Regulace systému nádrží**  
**Tanks system regulation**

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.

Diplomant:

Caridad Montes

Ostrava: 22. 5. 2009

**Vysoká škola:** VŠB – Technická univerzita Ostrava**Fakulta:** strojn**Katedra:** Automatizační techniky a řízení 352**Školní rok:** 2008/2009

## Zadání bakalářské práce

**Student:** Caridad Montes**Bakalářský bor:** Aplikovaná informatika a řízení 3902R001-70**Forma studia:** Kombinovaná**Název tématu:** Regulace systému nádrží*Tanks system regulation*

### Zásady pro zpracování ročníkového projektu:

1. Seznamte se s laboratorním modelem systému nádrží. Zaměřte se na jeho hardwarové a softwarové vybavení.
2. Určete matematický model vybraného laboratorního modelu, využijte metody analytické nebo experimentální identifikace. Verifikujte správnost získaného matematického popisu.
3. Vybranými metodami syntézy regulačních obvodů seříd'te konveční regulátory PID pro daný laboratorní model.
4. Správnost seřizení regulátorů ověřte jak pomocí číslicové simulace, tak i přímo na laboratorním modelu.
5. Kriticky zhodno'te dosažené výsledky a navrhněte další směr řešení.

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 22. 5. 2009

.....  
Caridad Montes

Prohlašuji, že

- byla jsem seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnou licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě: 22. 5. 2009

.....  
Caridad Montes

Adresa trvalého pobytu diplomanta:

Okružní 1087  
735 81, Nový Bohumín

## **Anotace bakalářské práce**

Montes, C. *Regulace systému nádrží*. Ostrava: katedra ATR-352 VŠB-TU, 2009. 38 s.

Bakalářská práce, vedoucí Ing. Wagnerová, R. Ph.D.

Tato práce se zabývá návrhem regulátoru pro systém nádrží. V úvodní části je popsán laboratorní model jeho hardwarové a softwarové vybavení. Dále byly určeny matematické modely vybraného laboratorního modelu pro regulaci výšky hladiny v jednotlivých nádržích pomocí metod experimentální identifikace, jejich správnost byla ověřena pomocí simulace. Vybranými metodami syntézy byly seřizeny konvenční algoritmy regulace PID více metodami. A poté byla jejich správnost ověřena pomocí číslicové simulace, tak i přímo na laboratorním modelu.

## **Annotation of the thesis**

Montes, C. *Tanks system regulation*. Ostrava: Department of Control Systems and Instrumentation, Technical University of Ostrava, 2009. 38 p. Thesis, head Ing. Wagnerová, R. Ph.D.

This work deals with controllers tuning for laboratory model. The introduction part described laboratory model from the point of hardware and software equipment. Further the mathematic models for level control were determined by the help of experimental identification methods, their accuracy has been verified by help of computer simulation. Then conventional controllers PID were tune by chosen methods of synthesis and they were verify by the help of computer simulation, and also directly on laboratory model.

# OBSAH

<b>Seznam použitých symbolů a zkratk</b> .....	<b>7</b>
<b>1 Úvod</b> .....	<b>8</b>
<b>2 Popis laboratorního modelu</b> .....	<b>9</b>
2.1 Laboratorní model .....	9
2.2 Elektronická ovládací jednotka modelu .....	10
2.3 Popis CTRL jednotky modelu .....	11
2.4 Realizace propojení HPS s počítačem .....	12
2.5 Popis grafického uživatelského rozhraní pro HPS .....	13
<b>3 Určení matematického modelu systému nádrží</b> .....	<b>14</b>
3.1 Vybrané metody aproximace přechodových charakteristik .....	14
3.2 Naměřené hodnoty přechodových charakteristik .....	15
3.2.1 Přechodové charakteristiky první nádrže .....	15
3.2.2 Přechodové charakteristiky druhé nádrže .....	16
3.3 Výpočet matematických modelů .....	16
3.3.1 První nádrž.....	16
3.3.2 Druhá nádrž .....	19
<b>4 Návrh regulátorů pro laboratorní model nádrží</b> .....	<b>22</b>
4.1 Návrh regulátorů pro první nádrž .....	22
4.1.1 Simulační ověření navržených regulátorů první nádrže .....	25
4.1.2 Ověření metody Simulace přímo na laboratorním modelu první nádrže .....	26
4.2 Návrh regulátorů pro druhou nádrž .....	29
4.2.1 Simulační ověření navržených regulátorů druhé nádrže .....	32
4.2.2 Ověření metody Simulace přímo na laboratorním modelu druhé nádrže.....	33
<b>5 Závěr</b> .....	<b>36</b>
<b>6 Použitá literatura</b> .....	<b>37</b>

## Seznam použitých symbolů a zkratek

$A_{wy}$	modul kmitočtového přenosu řízení
$e$	regulační odchylka
$G_S(s)$	přenos soustavy, L-přenos
$G_R(s)$	přenos regulátoru, L-přenos
$G_{wy}$	přenos řízení
$h$	výška hladiny kapaliny [m]
$k_I$	zesílení regulátoru, zesílení přenosu
$k_P$	zesílení regulátoru
$t$	spojitý čas [s]
$t_R$	doba regulace [s]
$T$	vzorkovací perioda[s]
$T_I$	setrvačná časová konstanta [s]
$T_d$	dopravní zpoždění [s]
$u$	akční veličina, řízení, vstupní veličina (vstup)
$u_{\infty}$	ustálená hodnota vstupní veličiny
$v$	poruchová veličina
$w$	žádaná veličina
$y$	výstupní veličina soustavy
$y_{\infty}$	ustálená hodnota výstupní veličiny
HPS	hydraulicko-pneumatická soustava
I	integrační regulátor
Konst.	konstanta

## 1 Úvod

Hlavním cílem této práce je seznámení s laboratorním modelem Hydraulicko-pneumatická soustava, určit jeho matematický model a navrhnout vhodné typy regulátoru. V úvodu bude popsán laboratorní model, jeho struktura, hardwarové a softwarové vybavení. Matematické modely budou určeny na základě metod experimentální identifikace z naměřených přechodových charakteristik. Vybranými metodami syntézy budou navrženy vhodné regulátory z řad konvenčních regulátorů typu PID. Jejich správnost bude ověřena jak pomocí číslicové simulace, tak i přímo na laboratorním modelu. Dosažené výsledky budou zhodnoceny z hlediska jejich použitelnosti v praxi.



## 2 Popis laboratorního modelu

V této kapitole bude podrobně popsána struktura laboratorního modelu hydraulicko-pneumatická soustava (HPS), jeho jednotlivé části a způsob možností připojení k počítači, regulace.

### 2.1 Laboratorní model

Tento laboratorní model se skládá ze dvou dvojic vedle sebe umístěných hydraulických nádrží, viz obr. 1. Nádrže jsou stejně vysoké, ale vnitřní průřez je u levé nádrže (z našeho pohledu) menší než u pravé. Do obou nádrží je voda čerpána ze zásobní nádoby. Voda přitéká do horní nádrže a clonou ve dně protéká do spodní nádoby. Ze spodní nádoby voda zase protéká do zásobní nádrže. Tento laboratorní model je kombinací hydraulických a pneumatických prvků.



Obr. 1 – Hydraulicko-pneumatická soustava

U hydraulických úloh jsou prostory uzavřené nad vodními hladinami a navzájem propojeny přes pneumatické obvody (vzdušníky), clonami propojeny s vnější atmosférou. Pneumatické obvody tvoří vazbu na rozdíl od hydraulických, přes kterou se navzájem dva hydraulické obvody ovlivňují. Výsledkem je dvourozměrná soustava s vnitřními interakcemi, jejichž velikost lze nastavit velikostí clon u pneumatických nádob. Pomocí příkonu čerpadel se ovládají průtoky vody v obou větvích, které představují akční členy. Přes výměnné clonky jsou

pneumatické nádoby propojeny s vnější atmosférou. Hladiny ve spodních nádobách se měří diferenčními snímači tlaku TMDG 568 Z3F od firmy Cressto.



Obr. 2 – Blokové schéma úlohy

**Akční veličiny  $u_1, u_2$**  – jsou ve dvou paralelních větvích průtoky vody. Oba průtoky jsou v rozsahu 0 až 10 V, které ovládají výkon čerpadel přes výkonové členy. Ovládací jednotce je vstupní napětí převedeno na rozsah 4 až 10 V.

**Regulované veličiny  $y_1, y_2$**  – jsou ve spodních nádržích hladiny. Výstupní signály jsou v rozsahu 0 až 10 V pro výšku hladin v rozmezí 0 až 30 cm.

**Vazba mezi obvody** – jsou nastaveny připojením pneumatických nádob ručními ventily a velikostí clon, které s vnější atmosférou propojují nádoby.

**Propojení s počítačem** – je pomocí 2 vstupních a 2 výstupních napětí propojena přes sériovou linku s využitím CTRL jednotky, doplněná programovým vybavením pro práci v prostředí MATLAB. Je tak možné používat akviziční kartu s podporou RT toolbox.

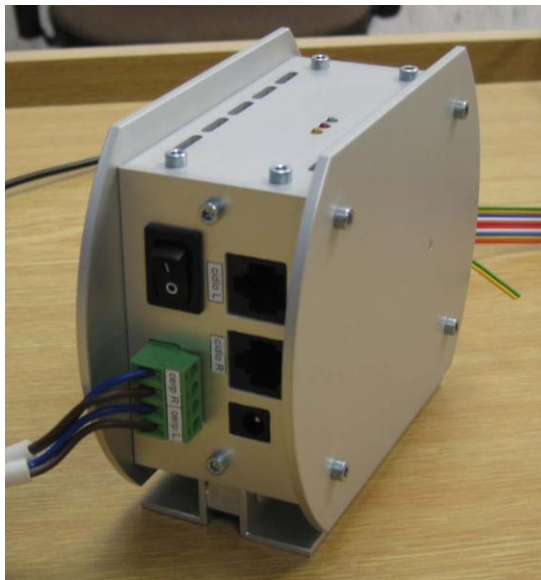
[KLEČKA, R. & MAHDAL, M., 2007]

## 2.2 Elektronická ovládací jednotka modelu

Elektronická ovládací jednotka modelu má zdroj napětí pro napájení snímačů tlaku a výkonový člen pro ovládání čerpadla. Byla navržena a vyrobena na Katedře řízení procesů a výpočetní techniky na univerzitě v Pardubicích. Napájení ovládací jednotky je zajištěno ze zdroje 12V/5A. Pro funkci jednotky je vyrobeno zbylé napětí z napájecího zdroje. Na horním panelu jednotky jsou tři svítivé diody pro správnou funkci všech zdrojů. Žlutá dioda znamená přítomnost napájecího napětí zdroje, zelená a červená dioda znamená správnou funkci zdroje symetrického napětí pro napájení elektroniky jednotky.

Ovládací jednotka lze vidět na obr. 3. Na zadním panelu jednotky jsou umístěny rozebíratelné konektory, pro připojení akčních členů modelu a snímačů. Do zásuvné svorkovnice jsou připojeny akční členy na zadním panelu. Plochým kabelem do konektorů RJ45 jsou připojeny snímače tlaku. Odpojení zdroje ovládací jednotky je umístěn vypínač na zadním panelu. Nedílnou součástí napájecího zdroje je souosý konektor, který je připojen ke zdroji.

Při použití jiného zdroje napájení, než je zdroj dodávaný s modelem, je nutno zachovat příslušnou napájecí polaritu konektoru. Připojení ovládacích napětí akčních členů je konektor umístěn na předním panelu a také i propojení výstupu měřených napětí ze snímačů měřených veličin.



Obr. 3 – Elektronická ovládací jednotka

[KLEČKA, R. & MAHDAL, M., 2007]

### 2.3 Popis CTRL jednotky modelu

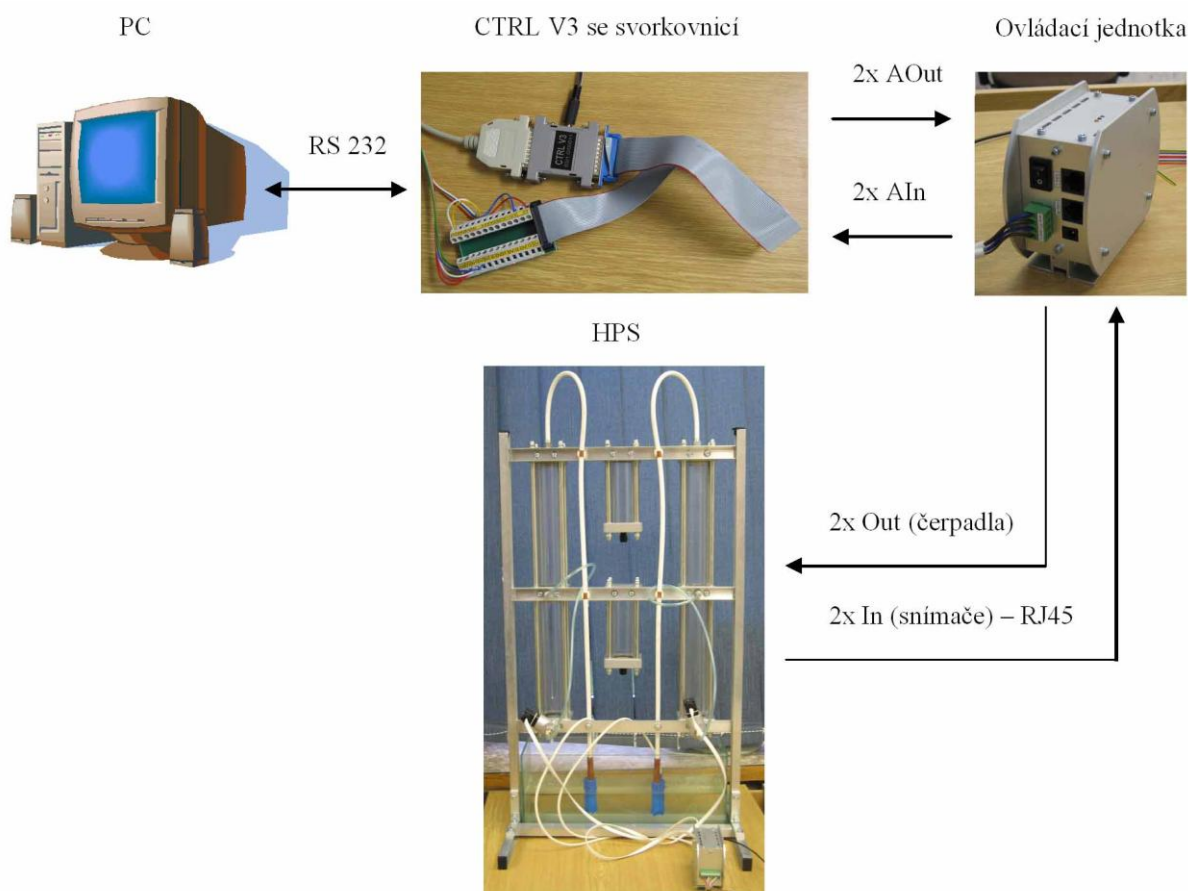
Jednotka CTRL V3 má 2 analogové výstupy (0-10 V, 50 mA), 4 analogové vstupy (0-10 V) a 4 logické vstupy a výstupy. K přímému ovládání 12V relé jsou přizpůsobeny logické výstupy. V běžném sériovém krytu je umístěna jednotka mezi dvěma konektory CANON 25. Signálový konektor je na jedné straně a konektor pro sériovou linku je na druhé straně, která má opto-elektrické oddělení. Není nutné instalovat žádné ovladače k připojení počítače. Speciální svorkovnici je možné zapojit k signálovému konektoru, která vnějšímu zařízení může usnadnit připojení. Jednotka CTRL V3 má napájení z univerzálního nestabilizovaného 12 V zdroje (min. 300 mA). Přívodní konektor USB/RS-232 je k dispozici v případě použití USB portu. Zvláštní ovladač se musí použít v případě připojení jednotky CTRL V3 k USB portu. K sériovému portu počítače stačí připojit jednotku CTRL V3 a je připravena k činnosti. Kromě měření a vysílání analogových a logických signálů na požádání, může jednotka také posílat obraz vstupu a výstupu periodicky a tím také vytvářet reálný čas pro MATLAB 6.

Následující parametry má sériová komunikace s jednotkou: 19200 Baud, 8 datových bitů, bez parity. Signál DTR musí být ve stavu ON, jinak neodpovídá jednotka, ale povely provádí výstupní.

[KLEČKA, R. & MAHDAL, M., 2007]

## 2.4 Propojení HPS s počítačem

Pro propojení HPS s počítačem a nastavení zvolené úlohy se síťovým vypínačem se zapne ovládací jednotka s elektronickými obvody. Tím je úloha připravena k provozu. Ovládání a měření se provádí pomocí počítače a závisí na použitém druhu spojení.

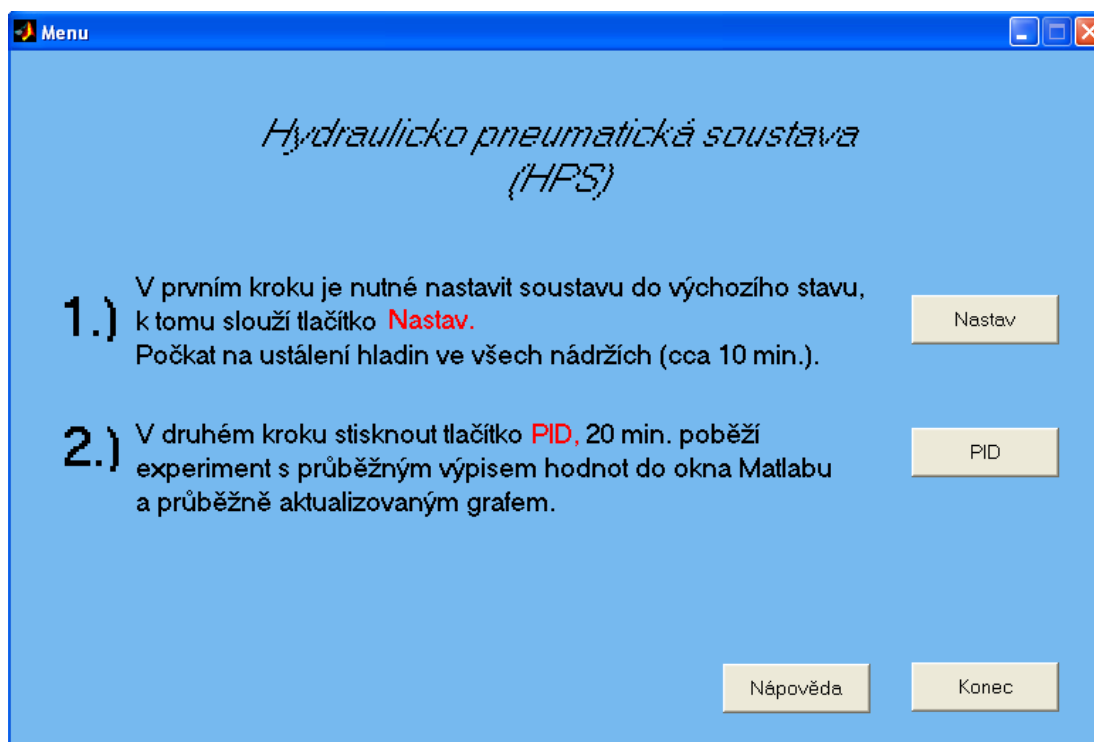


Obr. 4 – Realizace propojení HPS s počítačem

[KLEČKA, R. & MAHDAL, M., 2007]

## 2.5 Popis grafického uživatelského rozhraní pro HPS

Program MATLAB/Simulink nabízí nástroj pro tvorbu grafického uživatelského prostředí (GUI). Tyto nástroje pomáhají k rychlému procesu návrhu a tvorby. Obrazovka obsahuje dvě základní tlačítka. První tlačítko „Nastav“ spouští M-file s názvem „nastav. m“. Jeho úkolem je připojit jednotku CTRL V3, nastavit zadanou hodnotu, přečíst vstupy a ukončit práci s CTRL. Zadaná hodnota napětí je 4 V na levém a 5V na pravém čerpadle. Po uplynutí cca 10 min můžeme zmáčknout tlačítko „PID“. V tom případě se spustí M-file s názvem „PCH\_PID.m“. Zahájíme tak regulační proces s definovanými hodnotami žádané veličiny a nastavenými stavitelnými parametry regulátoru PID. V neposlední řadě tlačítko „Nápověda“ a „Konec“.



Obr. 5 – Grafické rozhraní pro ovládání soustavy.

[KLEČKA, R. & MAHDAL, M., 2007]

### 3 Určení matematického modelu systému nádrží

Matematické modely jsme určili z naměřených přechodových charakteristik, které jsme aproximovali následujícími metodami.

#### 3.1 Vybrané metody aproximace přechodových charakteristik

- **Aproximace proporcionální soustavou se setrvačností 1. řádu**

Identifikace systému pomocí aproximace změřených přechodových charakteristik patří mezi deterministické metody. Proporcionální soustava se setrvačností 1. řádu je popsána následujícím přenosem

$$G_s \Rightarrow \frac{k_1}{T_1 s + 1},$$

kde  $k_1$  - zesílení soustavy a  $T_1$  - setrvačná časová konstanta.

Zesílení soustavy  $k_1$  se získá podílem ustálených hodnot výstupní a vstupní veličiny.

$$k_1 = \frac{y_{\infty}}{u_{\infty}},$$

kde  $y_{\infty}$  - ustálená hodnota výstupní veličiny a  $u_{\infty}$  - ustálená hodnota vstupní veličiny.

Setrvačnou časovou konstantu  $T_1$  určíme, z hodnoty  $0,63 y_{\infty}$ .

[NOSKIEVIČ, P. 1999]

- **Aproximace dvoubodovou metodou - varianta č. 1**

U této metody předpokládáme následující tvar přenosu soustavy.

$$G_s \Rightarrow \frac{k_1}{T_1 s + 1} \cdot e^{-T_d s},$$

kde  $T_d$  je dopravní zpoždění. Jedná se o proporcionální soustavu se setrvačností prvního řádu s dopravním zpožděním.

Parametry přenosu určíme následujícím způsobem:

1. Stanovíme hodnoty  $y_{0,7} = 0,7 \cdot y_{\infty}$  a  $y_{0,33} = 0,33 \cdot y_{\infty}$  a jimi odpovídající časové okamžiky  $t_{0,7}$  a  $t_{0,33}$ .

2. Z hodnot  $t_{0,7}$  a  $t_{0,33}$  vypočteme parametry přenosu podle vztahů:

$$T_d = 1,498 \cdot t_{0,33} - 0,498 \cdot t_{0,7}, \quad T_1 = 1,245 \cdot (t_{0,7} - t_{0,33})$$

3. Zesílení  $k_1$  se vypočte stejně jako u předchozí aproximace.

[NOSKIEVIČ, P. 1999]

### • *Aproximace dvoubodovou metodou - varianta č. 2*

Opět předpokládáme tvar přenosu s proporcionální soustavou se setrvačností 2. řádu s dopravním zpožděním.

1. Stanovíme hodnoty  $y_{0,63} = 0,63 \cdot y_{\infty}$  a  $y_{0,28} = 0,28 \cdot y_{\infty}$  a jimi odpovídající časové okamžiky  $t_{0,63}$  a  $t_{0,28}$ .

2. Z hodnot  $t_{0,63}$  a  $t_{0,28}$  vypočteme parametry přenosu podle vztahů:

$$T_d = 1,5 \cdot \left( t_{0,28} - \frac{1}{3} \cdot t_{0,63} \right), \quad T_1 = 1,5 \cdot (t_{0,63} - t_{0,28})$$

3. Vypočteme zesílení  $k_1$ .

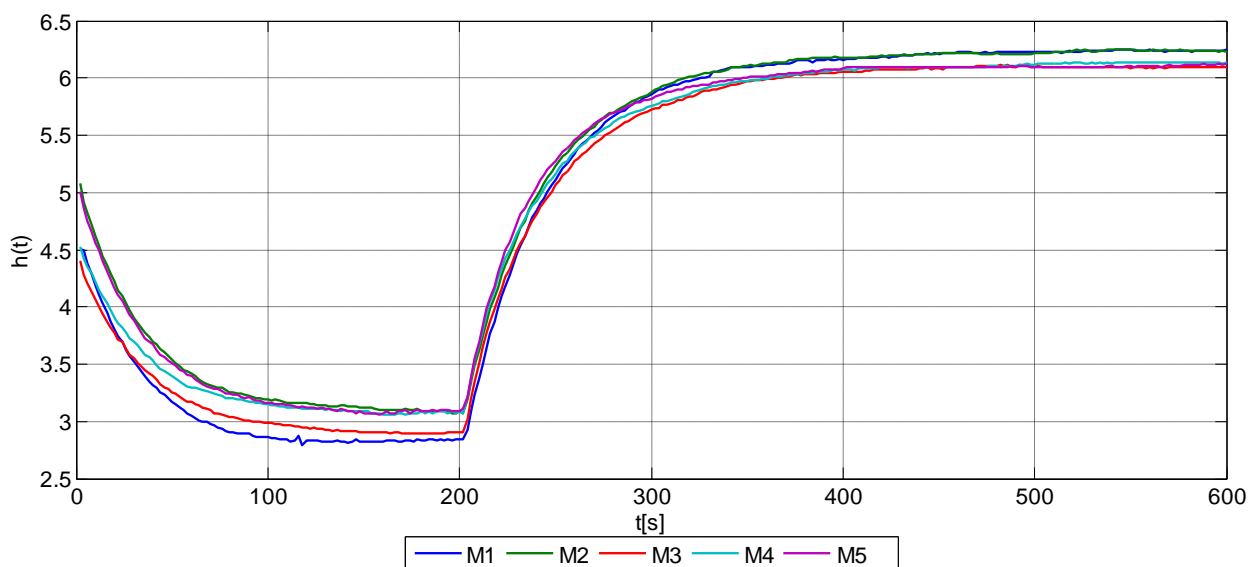
[ŠATÁNEK, J. 1995]

## 3.2 *Naměřené hodnoty přechodových charakteristik*

Pro určení matematického modelu jsme naměřili 5 průběhů přechodových charakteristik, které jsou vidět na obr. 3.1 a 3.2. Z naměřených hodnot jsme získaly průměrnou hodnotu, kterou jsme posléze aproximovali výše popsány metodami.

### 3.2.1 *Přechodové charakteristiky první nádrže*

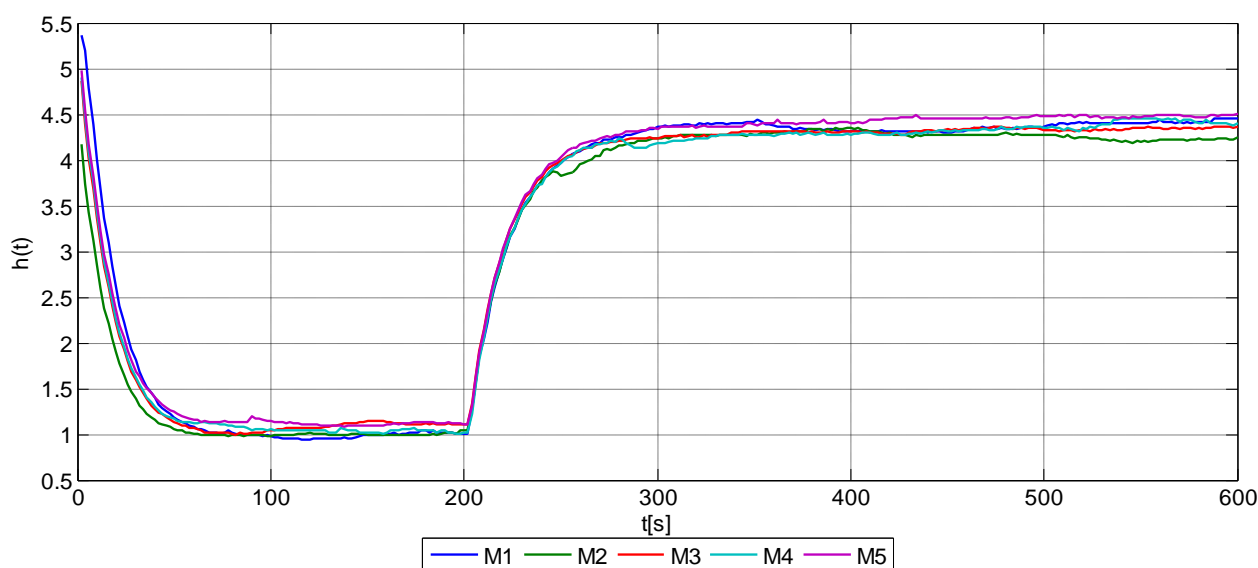
Na obr. 3.1 jsou vidět naměřené hodnoty přechodových charakteristik první nádrže.



Obr. 3.1 – Naměřené přechodové charakteristiky výšky hladiny první nádrže.

### 3.2.2 Přechodové charakteristiky druhé nádrže

Na obr. 3.2 jsou vidět naměřené hodnoty druhé nádrže přechodových charakteristik.



Obr. 3.2 – Naměřené přechodové charakteristiky výšky hladiny druhé nádrže.

### 3.3 Výpočet matematických modelů

Vycházeli jsme z změřených přechodových charakteristik, ze kterých jsme odečetli požadované parametry pro jednoduché aproximace, které jsme aproximovali.

#### 3.3.1 První nádrž

Pro určení matematického modelu jsme použili všechny metody popsané v kapitole 3.1. Z měřených přechodových charakteristik, jsme určili následující hodnoty konstant přenosu soustavy.

- Aproximace proporcionální soustavou se setrvačností 1. řádu

Ustálené hodnoty výstupní a vstupní veličiny:

$$u_{\infty} = 5 \text{ V}, y_{\infty} = 3,08 \text{ V}$$

Zesílení  $k_1$  se vypočte pro všechny metody stejně a to:

$$k_1 = \frac{y_{\infty}}{u_{\infty}} = \frac{3,08}{5} = 0,624$$

Pro určení setrvačné časové konstanty musíme určit čas, kdy dosáhneme 63% ustálené hodnoty.

$$y_{0,63} = 0,63 \cdot y_{\infty} = 0,63 \cdot 3,08 = 1,94 \text{ V}$$



Odečtením hodnoty jsme zjistili, že hodnota časového okamžiku je  $t_{0,63}=40s$ .

Po dosazení hodnot do obrazového přenosu dostaneme následující tvar:

$$G_s \Rightarrow \frac{0,624}{40s + 1}$$

### • Aproximace dvoubodovou metodou - varianta č. 1

Z přechodové charakteristiky odečteme časové okamžiky, kdy dosáhneme 70% a 33% ustálené hodnoty.

$$y_{0,7} = 0,7 \cdot y_{\infty} = 0,7 \cdot 3,08 = 2,15 V$$

$$y_{0,33} = 0,33 \cdot y_{\infty} = 0,33 \cdot 3,08 = 1,01 V$$

Z toho vyplývá, že  $t_{0,7}=50s$  a  $t_{0,33}=18s$ .

Nyní vypočítáme časové konstanty přenosu:

$$T_{d1} = 1,498 \cdot t_{0,33} - 0,498 \cdot t_{0,7} = 1,498 \cdot 18 - 0,498 \cdot 50 = 2,06 s$$

$$T_1 = 1,245 \cdot (t_{0,7} - t_{0,33}) = 1,245 \cdot (50 - 18) = 39,8 s$$

Po dosazení vyjde následující tvar přenosu:

$$G_s \Rightarrow \frac{0,624}{39,8s + 1} \cdot e^{-2,06s}$$

### • Aproximace dvoubodovou metodou - varianta č.2

Musíme určit časové okamžiky, kdy dosáhneme 63% a 28% ustálené hodnoty.

$$y_{0,63} = 0,63 \cdot y_{\infty} = 0,63 \cdot 3,08 = 1,94 V$$

$$y_{0,28} = 0,28 \cdot y_{\infty} = 0,28 \cdot 3,08 = 0,86 V$$

Z toho vyplývá, že časové okamžiky jsou  $t_{0,63}=40s$  a  $t_{0,28}=14s$ .

Nyní vypočteme konstanty přenosu:

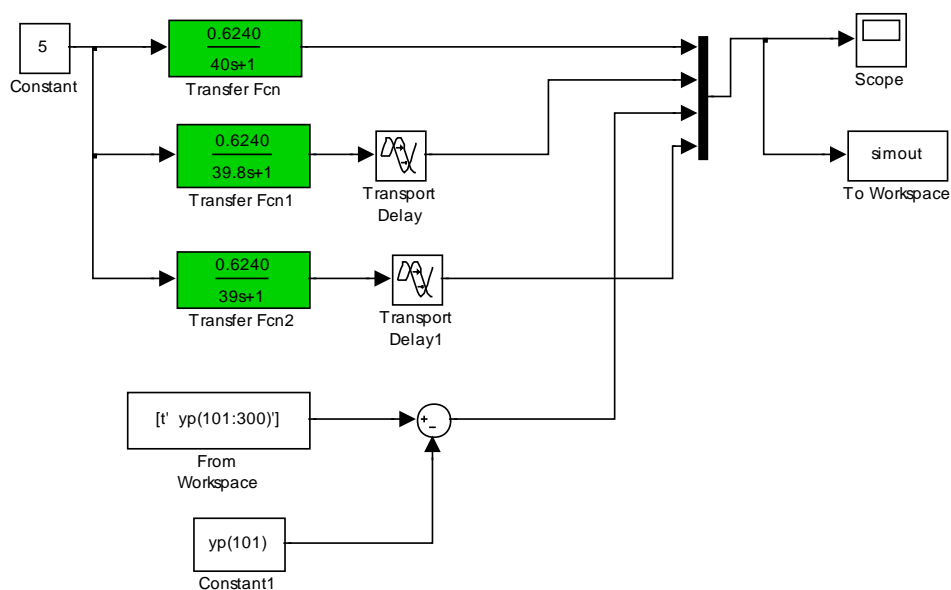
$$T_d = 1,5 \cdot \left( t_{0,28} - \frac{1}{3} \cdot t_{0,63} \right) = 1,5 \cdot \left( 14 - \frac{1}{3} \cdot 40 \right) = 1,005 s$$

$$T_1 = 1,5 \cdot (t_{0,63} - t_{0,28}) = 1,5 \cdot (40 - 14) = 39 s$$

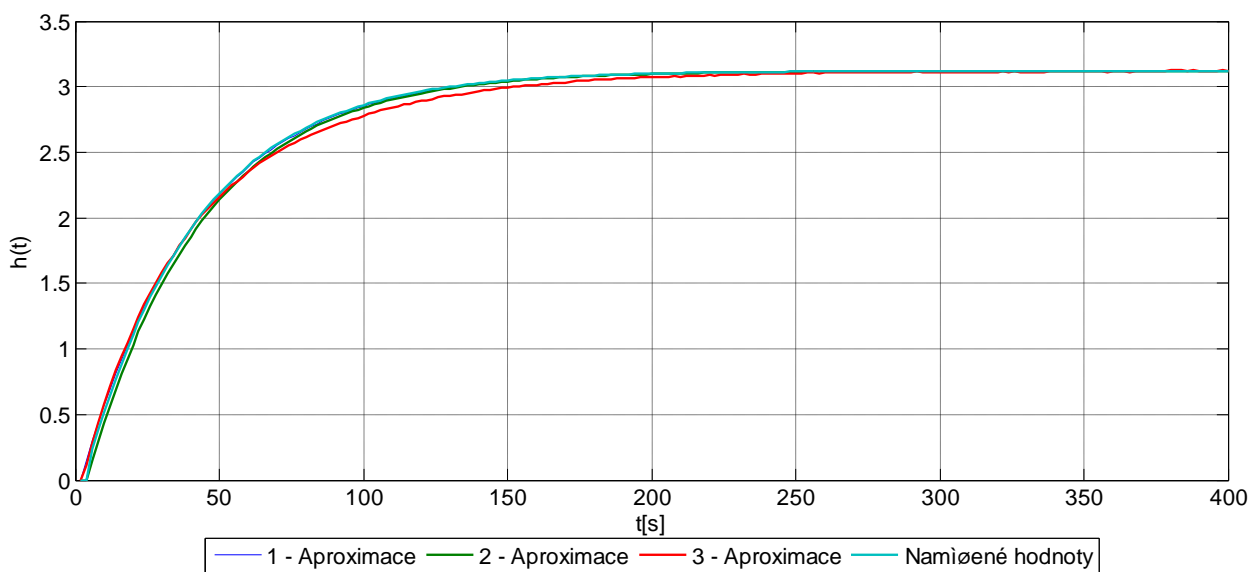
Po dosazení hodnot do obrazového přenosu dostaneme:

$$G_s \Rightarrow \frac{0,624}{39s + 1} \cdot e^{-1,005s}$$

Abychom zjistili, která aproximace je nejpřesnější, vytvořili jsme simulační model všech 3 aproximací a porovnali s naměřenými hodnotami, viz obr. 3.4. V tab. 3.1 vidíme výsledky porovnání přesnosti těchto aproximací a nejpřesnější je ta, co má nejmenší odchylku.



Obr. 3.3 – Simulační model pro ověření přesnosti aproximace první nádrže.



Obr. 3.4 – Průběh výšky hladiny první nádrže.

Pro návrh regulace použijeme tvar přenosu u 3 aproximace.

Tab. 3.1 – Výsledky měření první nádrže.

Aproximace	Obrazový přenos	Přiléhavost
1. metoda	$G_s \approx \frac{0,624}{40s + 1}$	$\sum e^2 = 0,234$
2. metoda	$G_s \approx \frac{0,624}{39,8s + 1} \cdot e^{-2,06s}$	$\sum e^2 = 0,429$
3. metoda	$G_s \approx \frac{0,624}{39s + 1} \cdot e^{-1,005s}$	$\sum e^2 = 0,175$

### 3.3.2 Druhá nádrž

Z naměřených charakteristik jsme určili následující aproximace:

- Aproximace proporcionální soustavou se setrvačností 1. řádu

Ustálené hodnoty výstupní a vstupní veličiny:

$$u \approx 4 \text{ V}, \quad y \approx 3,33 \text{ V}$$

Zesílení  $k_1$  se vypočte pro všechny metody stejně a to:

$$k_1 = \frac{y \approx 3,33}{u \approx 4} = 0,8345$$

Musíme určit časový okamžik, kdy dosáhneme 63% ustálené hodnoty.

$$y_{0,63} = 0,63 \cdot y \approx 0,63 \cdot 3,33 = 2,09 \text{ V}$$

Odečtením hodnoty jsme zjistili, že hodnota časového okamžiku je  $t_{0,63}=24\text{s}$ .

Po dosazení hodnot do obrazového přenosu dostaneme:

$$G_s \approx \frac{0,8345}{24s + 1}$$

- Aproximace dvoubodovou metodou - varianta č. 1

Musíme určit časové okamžiky, kdy dosáhneme 70% a 33% ustálené hodnoty.

$$y_{0,7} = 0,7 \cdot y \approx 0,7 \cdot 3,33 = 2,33 \text{ V}$$

$$y_{0,33} = 0,33 \cdot y \approx 0,33 \cdot 3,33 = 1,09 \text{ V}$$

Z toho vyplývá, že časové okamžiky jsou  $t_{0,7}=28\text{s}$  a  $t_{0,33}=10\text{s}$ .

Nyní vypočteme konstanty přenosu:

$$T_d = 1,498 \cdot t_{0,33} - 0,498 \cdot t_{0,7} = 1,498 \cdot 10 - 0,498 \cdot 28 = 1,04 \text{ s}$$

$$T_1 = 1,245 \cdot (t_{0,7} - t_{0,33}) \approx 1,245 \cdot (28 - 10) \approx 22,41 \text{ s}$$

Po dosazení hodnot do obrazového přenosu dostaneme:

$$G_s \Rightarrow \frac{0,8345}{22,41s + 1} \cdot e^{-1,04s}$$

• **Aproximace dvoubodovou metodou - varianta č. 2**

Pro určení časového okamžiku, kdy dosáhneme 63% a 28% ustálené hodnoty nám vyplývá, že časové okamžiky budou  $t_{0,63} = 22s$  a  $t_{0,28} = 8s$

$$y_{0,63} = 0,63 \cdot y_{\infty} = 0,63 \cdot 3,33 = 2,09 \text{ V}$$

$$y_{0,28} = 0,28 \cdot y_{\infty} = 0,28 \cdot 3,33 = 0,93 \text{ V}$$

Nyní vypočteme dopravní zpoždění a časové konst.:

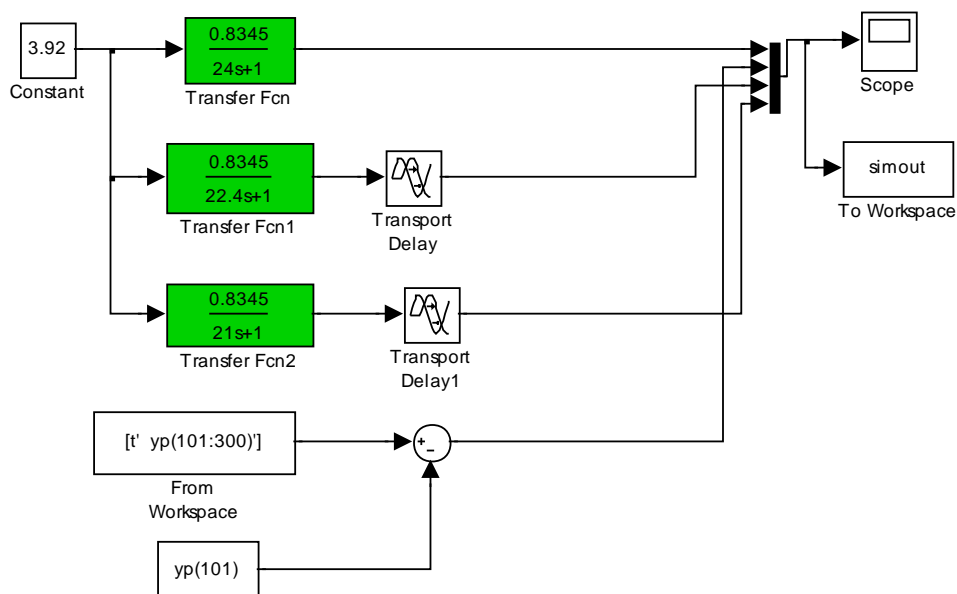
$$T_d = 1,5 \cdot \left( t_{0,28} - \frac{1}{3} \cdot t_{0,63} \right) = 1,5 \cdot \left( 8 - \frac{1}{3} \cdot 22 \right) = 1,005 \text{ s}$$

$$T_1 = 1,5 \cdot (t_{0,63} - t_{0,28}) = 1,5 \cdot (22 - 8) = 21 \text{ s}$$

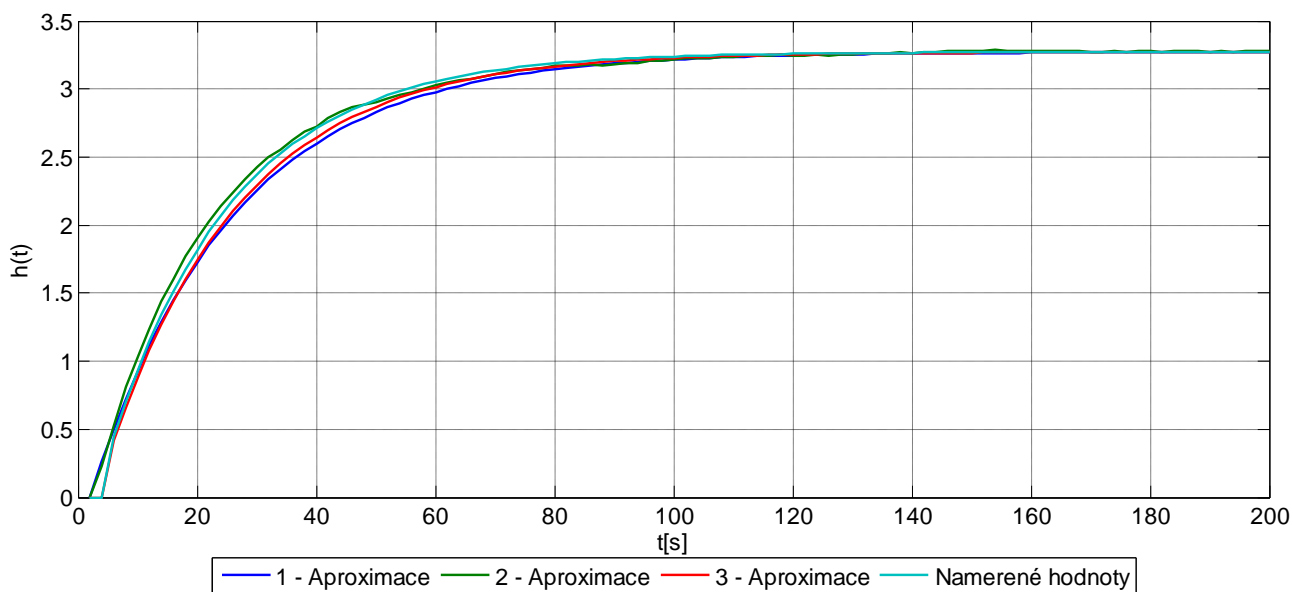
Po dosazení hodnot do obrazového přenosu dostaneme:

$$G_s \Rightarrow \frac{0,8345}{21s + 1} \cdot e^{-1,005s}$$

Pro zjištění u druhé nádrže, které aproximace jsou nejpřesnější, jsme vytvořili simulační model všech 3 aproximací a porovnali s naměřenými hodnotami, viz obr. 3.6. V tab. 3.2 vidíme výsledky porovnání přesnosti těchto aproximací a nejpřesnější je ta, co má nejmenší odchylku.



Obr. 3.5 – Simulační model druhé nádrže.



Obr. 3.6 – Porovnání naměřených a aproximovaných hodnot výšky hladiny druhé nádrže.

Pro návrh regulace použijeme tvar přenosu první aproximace.

Tab. 3.2 – Výsledky měření druhé nádrže.

Aproximace	Obrazový přenos	Přiléhavost
1. Metoda	$G_s \approx \frac{0,8345}{24s + 1}$	$\sum e^2 = 0,227$
2. Metoda	$G_s \approx \frac{0,8345}{22,41s + 1} \cdot e^{-1,04s}$	$\sum e^2 = 0,406$
3. Metoda	$G_s \approx \frac{0,8345}{21s + 1} \cdot e^{-1,005s}$	$\sum e^2 = 0,330$

## 4 Návrh regulátorů pro laboratorní model nádrží

Syntéza regulačního obvodu patří k nejdůležitějším činnostem při návrhu regulačního obvodu. To znamená, že určujeme vhodný typ regulátoru a hodnoty jeho stavitelných parametrů z hlediska zadaných požadavků na kvalitu regulace. Stupeň astatismu regulačního obvodu  $q=0$ , se volí pro typ regulačního obvodu, který má trvalé regulační odchylky, což je nežádoucí. Nulové trvalé regulační odchylky zaručuje vyšší stupeň astatismu  $q$ , avšak současně způsobuje podstatné znesnadnění seřízení a náchylnost k nestabilitě regulačního obvodu. U velmi jednoduchých regulačních obvodů s nízkými požadavky na kvalitu regulace se používá stupeň astatismu  $q=0$ . Trvalé regulační odchylky by byly nepřijatelně velké v případě regulace soustav s dopravním zpožděním. Všeobecně platí, že vyšší kvalitu regulace zajistí regulátor obsahující více složek. Při požadované kvalitě je úkolem regulátoru zajistit splnění celého cíle regulace.

[VÍTEČKOVÁ, M. & VÍTEČEK, A. 2006]

### 4.1 Návrh regulátorů pro první nádrž

U první nádrže jsme vybrali dvě metody regulace vhodné pro soustavy s dopravním zpožděním.

- **„Univerzální“ Experimentální metoda**

Je to metoda pro regulované soustavy s přenosy  $G_s \Leftrightarrow \frac{k_1}{T_1 s + 1} e^{-T_d s}$  a  $G_s \Leftrightarrow \frac{k_1}{s} e^{-T_d s}$ ,

která umožňuje seříditi konvenční regulátory jak z hlediska žádané veličiny  $w$ , tak i poruchové veličiny  $v$  působící na vstupu regulované soustavy, při čemž kritériem kvality regulace může být nejrychlejší odezva bez překmitu, nejrychlejší odezva s relativním překmitem  $\kappa = 0,2$  [20%] nebo minimální kvadratická regulační odchylka.

V našem případě jsme použili metodu nejrychlejší odezvy bez překmitu.

Tab. 4.1 – Hodnoty stavitelných parametrů regulátorů pro „univerzální“ experimentální metodu.

$\frac{k_1}{T_1 s + 1} e^{-T_d s}$		Regulační pochod
		Nejrychlejší odezva bez překmitu
Typ regulátoru		Žádané veličiny w
P	$k_p^*$	$0,3 \frac{T_1}{k_1 T_d}$
PI	$k_p^*$	$0,35 \frac{T_1}{k_1 T_d}$
	$T_I^*$	$1,17 T_I$
PID	$k_p^*$	$0,6 \frac{T_1}{k_1 T_d}$
	$T_I^*$	$T_I$
	$T_D^*$	$0,5 T_d$

**P regulátor**

$$k_p^* = 0,3 \frac{T_1}{k_1 T_d}$$

$$k_p^* = 0,3 \frac{39}{0,624 \cdot 1,005}$$

$$k_p^* = 18,56$$

**PI regulátor**

$$k_p^* = 0,35 \frac{T_1}{k_1 T_d}$$

$$k_p^* = 0,3 \frac{39}{0,624 \cdot 1,005}$$

$$k_p^* = 21,76$$

$$T_I^* = 1,17 \cdot T_I$$

$$T_I^* = 1,17 \cdot 39$$

$$T_I^* = 45,63$$

**PID regulátor**

$$k_p^* = 0,6 \cdot \frac{T_1}{k_1 T_d}$$

$$k_p^* = 0,6 \cdot \frac{39}{0,624 \cdot 1,005}$$

$$k_p^* = 37,308$$

$$T_I^* = T_I$$

$$T_I^* = 39$$

$$T_D^* = 0,5 \cdot T_d$$

$$T_D^* = 0,5 \cdot 1,005$$

$$T_D^* = 0,502$$

[VÍTEČKOVÁ, M. &amp; VÍTEČEK, A. 2006]

• **Metoda požadovaného modelu**

Metoda požadovaného modelu (dříve nazývaná metoda inverze dynamiky) je analyticko-experimentální metoda seřizování konvenčních regulátorů, která vychází z požadovaného modelu uzavřeného regulačního obvodu, tj. z požadovaného přenosu řízení ve tvaru

$$G_{wy} = \frac{Y}{W} = \frac{a}{s + ae^{-T_d s}} e^{-T_d s}$$

kde  $a$  je zesílení otevřeného regulačního obvodu. Je to metoda velmi jednoduchá, která využívá kompenzaci časových konst., zajišťuje stupeň astatismu regulačního obvodu  $q=1$  a odpovídající volbou zesílení otevřeného regulačního obvodu a umožňuje dosáhnout požadovaného relativního překmitu  $\kappa$  v rozmezí 0 do 0,5 (50%).

$$T_1^* = T_1 - \frac{T}{2}$$

$$T_1^* = 39$$

$$k_p^* = \frac{T_1^*}{T + \beta T_d} k_1$$

$$k_p^* = \frac{39}{(282 \cdot 0 + 2,718 \cdot 1,005)} = 0,624$$

$$k_p^* = 22,88$$

**Tab. 4.2 – Závislost koeficientů  $\alpha$  a  $\beta$  na relativním překmitu  $\kappa$ .**

$\kappa$	0
$\alpha$	1,282
$\beta$	2,718

**Tab. 4.3 – Hodnoty stavitelných parametrů regulátorů pro metodu požadovaného modulu.**

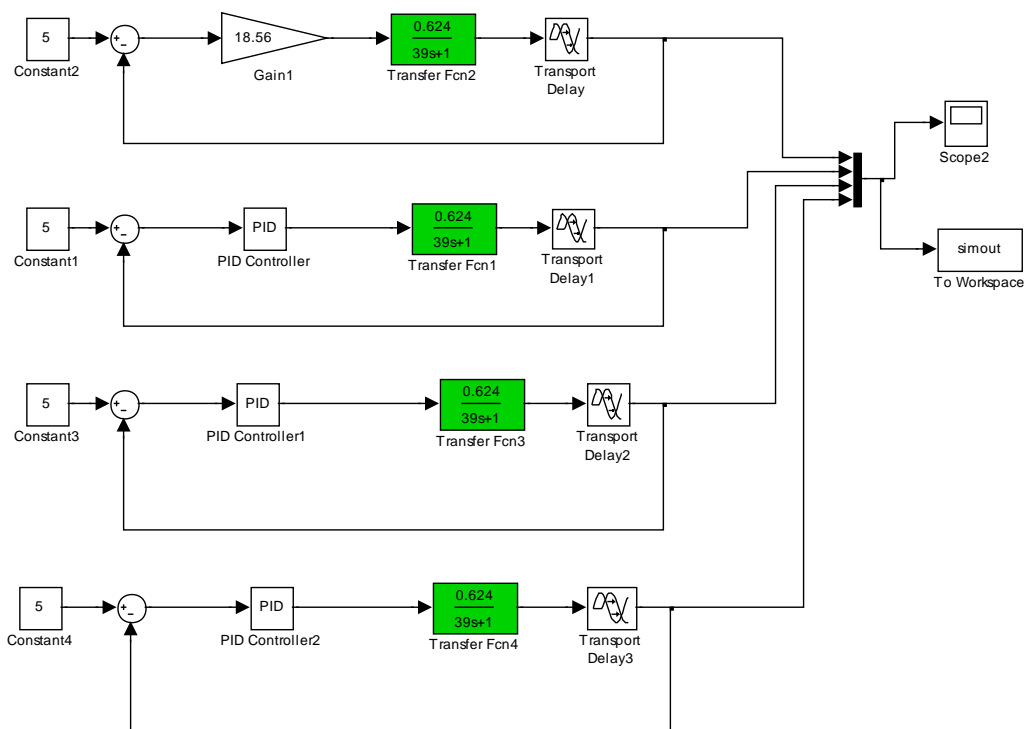
REGULOVANÁ SOUSTAVA	REGULÁTOR $\left\{ \begin{array}{l} \text{ANALOGOVÝ} \\ \text{ČÍSLICOVÝ} \end{array} \right. \begin{array}{l} T = 0 \\ T > 0 \end{array}$			
	TYP	$k_p^*$	$T_1^*$	$T_D^*$
$\frac{k_1}{T_1 s + 1} e^{-T_d s}$	PI	$\frac{T_1^*}{T + \beta T_d} k_1$	$T_1 - \frac{T}{2}$	---

[VÍTEČKOVÁ, M. & VÍTEČEK, A. 2006]

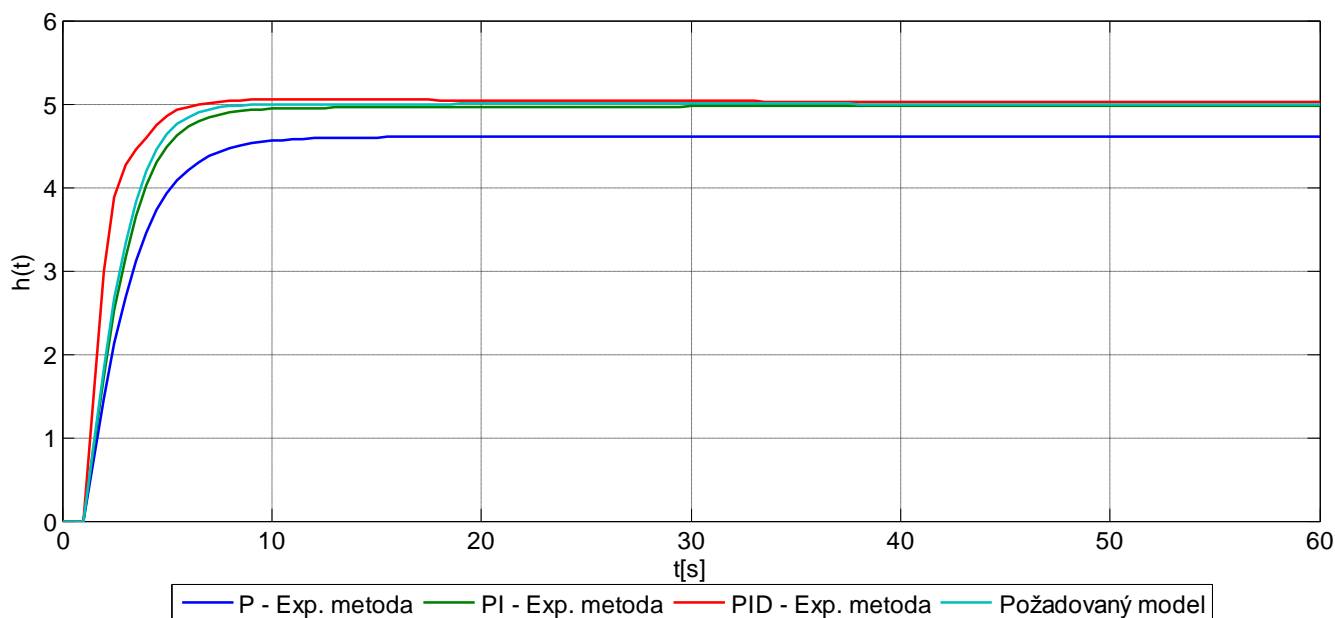


### 4.1.1 Simulační ověření navržených regulátorů první nádrže

Správnost navržených regulátorů jsme určili pomocí číslicové simulace, použili jsme simulační program Matlab/Simulink. Schéma simulačního modelu lze vidět na obr. 4.1, a průběh výšky hladiny na obr. 4.2.



Obr. 4.1 – Simulační model pro ověření navržených regulátorů první nádrže.

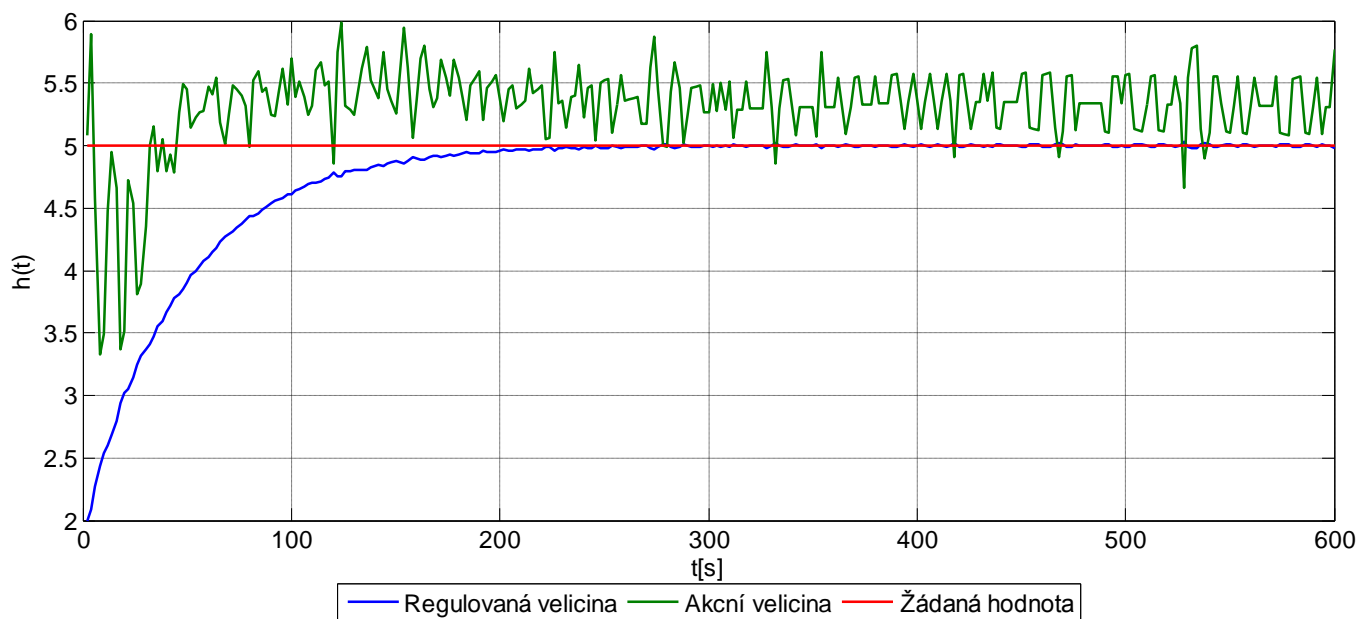


Obr. 4.2 – Průběh regulace výšky hladiny první nádrže – simulační ověření.

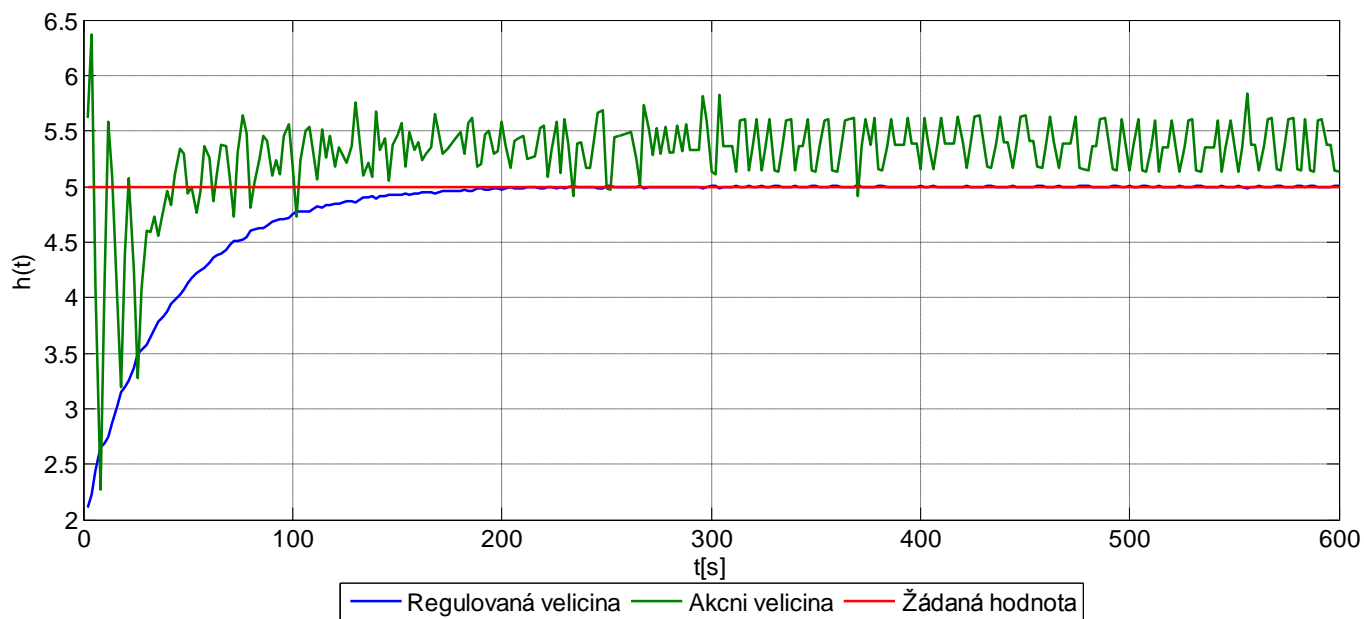
Pro regulaci výšky hladiny použijeme pouze PI a PID regulátory. P regulátor nepoužijeme, neboť vykazuje trvalou regulační odchylku (to se očekávalo).

#### 4.1.2 Ověření regulátorů přímo na laboratorním modelu první nádrže

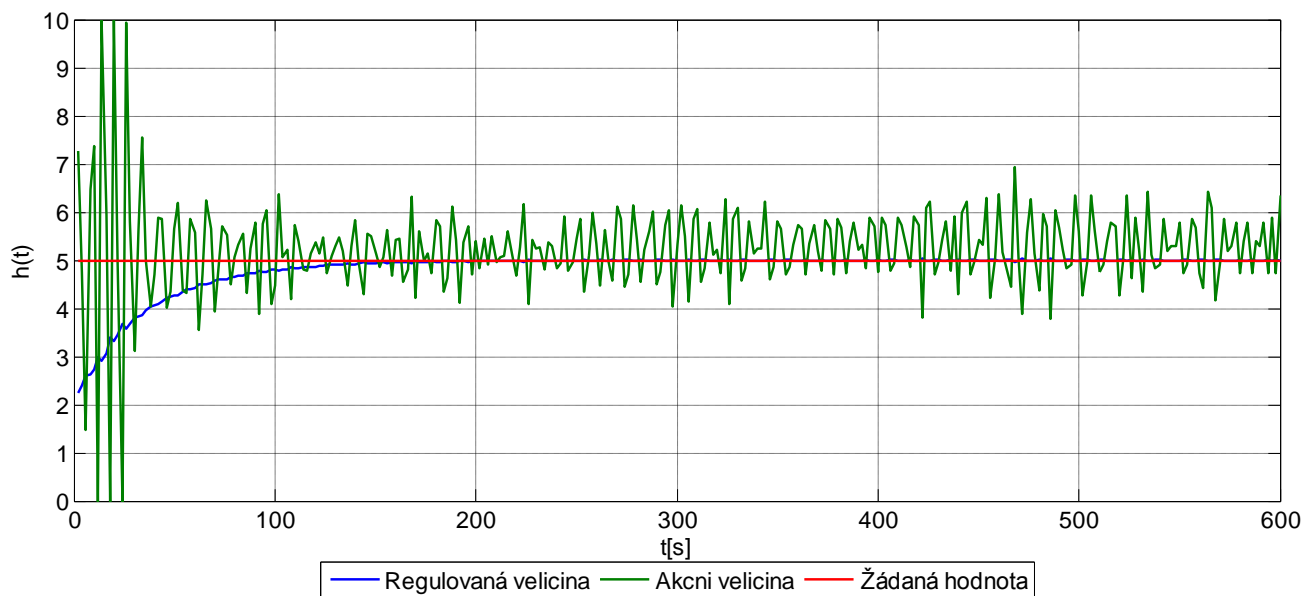
Průběhy regulace výšky hladiny pro jednotlivé regulátory jsou vidět na obr. 4.3 až 4.5. Na obr. 4.6 vidíme průběh výšky hladiny pro všechny 3 hladiny.



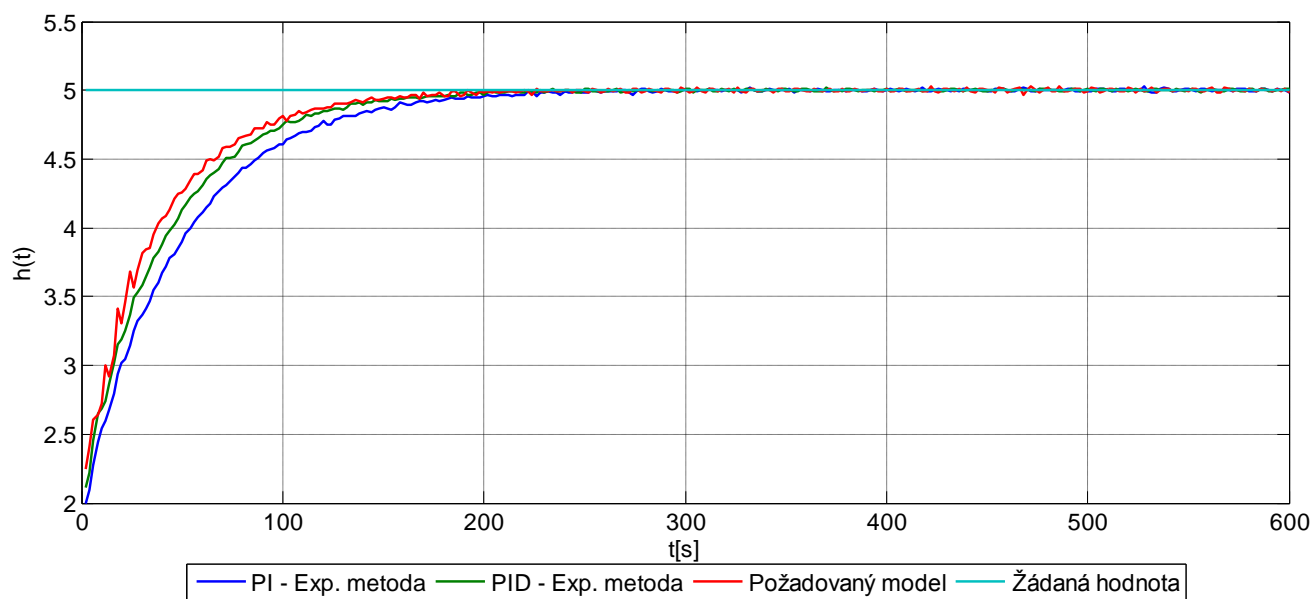
Obr. 4.3 – Regulace výšky hladiny pro PI regulátor seřízený pomocí experimentální metody.



Obr. 4.4 – Regulace výšky hladiny pro PID regulátor seřízený pomocí experimentální metody.



Obr. 4.5 – Regulace výšky hladiny seřízená pomocí požadovaného modelu.



Obr. 4.6 – Průběh regulace výšky hladiny všemi třemi navrženými regulátory.

Na obr 4.6 vidíme průběhy regulace výšky hladiny ověřené na laboratorním modelu.

Pro posouzení kvality regulace si propočítáme  $t_r$  – dobu regulace,  $\chi$  – překmit,

$e_w$  – trvalou regulační odchylku a  $IAE$  – absolutní regulovanou plochu.

### Překmit

$$\kappa = \frac{y_m - y(\infty)}{y(\infty)}, \quad y_m = y(t_m)$$

kde  $y_m$  – maximální hodnota regulované veličiny

$y_{\text{ref}}$  – ustálená hodnota regulované veličiny

$t_m$  – doba dosažení maximální hodnoty  $y_m$

Doba regulace  $t_r$  je dána časem, kdy regulovaná veličina  $y(t)$  vejde do pásma o šířce  $2\Delta$ , tj.

$y \in [y_{\text{ref}} - \Delta, y_{\text{ref}} + \Delta]$ , kde tolerance regulace je dána vztahem:  $\Delta = \delta \cdot y_{\text{ref}}$ ,  $\delta = 0,01 \div 0,05$ ,  $\delta \div 5\%$

Nejčastější hodnotou relativní tolerance regulace  $\delta$  jsou hodnoty 0,05 nebo 0,02.

### Trvalá regulační odchylka

Trvalou regulační odchylku lze určit podle vztahů jako:

$$E(s) = G_{we}(s)W(s) + G_{ve}(s)V(s) = E_w(s) + E_v(s)$$

$$e_w = \lim_{s \rightarrow 0} sE_w(s), \quad e_v = \lim_{s \rightarrow 0} sE_v(s)$$

kde  $e_w$  – trvalá regulační odchylka způsobená žádanou veličinou  $w$ ,

$e_v$  – trvalá regulační odchylka způsobená poruchovou veličinou  $v$ .

Uvedené vztahy platí také pro jiné skokové změny polohy vstupních signálů  $w$  a  $v$ , např.

Pro skokové změny rychlosti nebo zrychlení. Trvalé regulační odchylky lze snížit zvýšením zesílení regulátoru  $k_p$  (v případě použití regulátoru I snížením integrační časové konstanty  $T_I$ ).

### Absolutní regulační plocha

Kritérium absolutní regulační plochy  $I_{IAE}$  je vhodný jak pro kmitavé, tak i nekmitavé regulační pochody. Má jen nepříjemnou vlastnost, spočívá v bodech, ve kterých se  $e(t)$  mění znaménko a není definována derivace  $\dot{e}$ , proto hodnotu kritéria absolutní regulační plochy nelze vypočítat analyticky, ale pouze určit simulačně.

$$I_{IAE} = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

Tab. 4.4 – Ověření navržených regulátorů první nádrže.

Metody regulace	Doba regulace $t_r$	Překmit $\chi$	Trvalá regulační odchylka $e_w$	Absolutní regulační plocha IAE
PI – Exp. metoda	180	0	0	151,5
PID – Exp. metoda	210	0	0	126,1
Požadovaný model	210	0	0	113,1

## 4.2 Návrh regulátorů pro druhou nádrž

U druhé nádrže jsme vybrali tři metody vhodné pro soustavy bez dopravního zpoždění.

- **Metoda optimálního modulu**

Tato analytická metoda vychází z požadavků na přenos řízení, resp. modul kmitočtového přenosu řízení.

$$G_{wy}(\omega) \rightarrow 1 \Rightarrow G_{wy}(j\omega) \rightarrow 1 \Rightarrow A_{wy}(\omega) \rightarrow 1$$

$A_{wy}(\omega)$  - požadovaný průběh

Přenosový tvar máme  $G_S(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1} \Rightarrow G_R(s) = \frac{1}{T_1 s}$ , dosadíme do stavitelného parametru I.

$$T_I^* = 2k_1 \zeta_1 - 0,5T_1$$

$$T_I^* = 2k_1 (\zeta_1 - 1)$$

$$T_I^* = 2 \cdot 0,8345 (4 - 1)$$

$$T_I^* = 38,387$$

$$T_I^* = 2k_1 T_1 = 2 \cdot 0,8345 \cdot 24 = 40,056$$

$$\chi = \frac{y_{\max} - y_{\phi}}{y_{\phi}}$$

$$\chi = \frac{3,278 - 3}{3} \cdot 100$$

$$\chi = 9\%$$

Tab. 4.5 – Hodnota stavitelného parametru regulátoru pro metodu optimálního modulu.

REGULOVANÁ SOUSTAVA	REGULÁTOR			
	ANALOGOVÝ ČÍSLICOVÝ		$T = 0$ $T > 0$	
	TYP	$k_p^*$	$T_I^*$	$T_d^*$
$\frac{k_1}{T_1 s + 1}$	I	---	$2k_1 \zeta_1 - 0,5T_1$	---

[VÍTEČKOVÁ, M. & VÍTEČEK, A. 2006]

• **Metoda násobného dominantního pólu**

Metoda násobného dominantního pólu je jednoduchá analytická metoda umožňující seřadit regulátory s integrační složkou (I, PI, PID) pro proporcionální regulované soustavy s přenosem

$$G_s \approx \frac{k_1}{s^{i+1}}$$

Zvolený regulátor se seřídí tak, aby byl zajištěn jeden dominantní pól (samozřejmě stabilní) s maximální možnou násobností. Podle tvaru přenosu regulované soustavy a požadavku na kvalitu regulace jsme zvolili vhodný typ regulátoru v našem případě pro  $T_i^*$  platí,

$k_1 T_i \left(1 + \left(\frac{i+1}{i}\right)^i\right)$  podle kterých se určí hodnoty stavitelných parametrů.

$$T_i^* = k_1 T_i \left(1 + \left(\frac{i+1}{i}\right)^i\right)$$

$$T_i^* = 0,8345 \cdot 24 \left(1 + \left(\frac{1+1}{1}\right)^1\right)$$

$$T_i^* = 80,112$$

**Tab. 4.6 – Hodnota stavitelného parametru regulátoru pro metodu násobného dominantního pólu.**

$\frac{REGULOVANÁ}{SOUSTAVA}$	$REGULÁTOR \begin{cases} \text{ANALOGOVÝ} \\ \text{ČÍSLICOVÝ} \end{cases}$				
	TYP	$k_p^*$	$T_I^*$	$T_D^*$	Poznámka
$\frac{k_1}{s^{i+1}}$	I	---	$k_1 T_i \left(1 + \left(\frac{i+1}{i}\right)^i\right)$	---	$i \geq 1$

[VÍTEČKOVÁ, M. & VÍTEČEK, A. 2006]

- **Metoda standardních tvarů**

Metoda standardních tvarů vychází z

$$G_0 \Rightarrow \frac{k_1}{T_I s \cdot (s+1)}$$

$$G_0 \Rightarrow \frac{k_1}{T_I T_1 s^2 + T_I s}$$

$$N \Rightarrow T_I T_1 s^2 + T_I s + k_1$$

$$N \Rightarrow T_I T_1 \left( s^2 + \frac{s}{T_1} + \frac{k_1}{T_I T_1} \right)$$

Dosadíme do vzorce:  $s^2 + 1,4s + a^2$

Dostaneme:

$$1,4a = \frac{1}{T_1}$$

$$a^2 = \frac{k_1}{T_I T_1}$$

Vyjde nám:

$$1,4^2 \cdot \frac{1}{T_1^2} = \frac{k_1}{T_I T_1}$$

$$T_I = k_1 T_1 \cdot 1,4^2$$

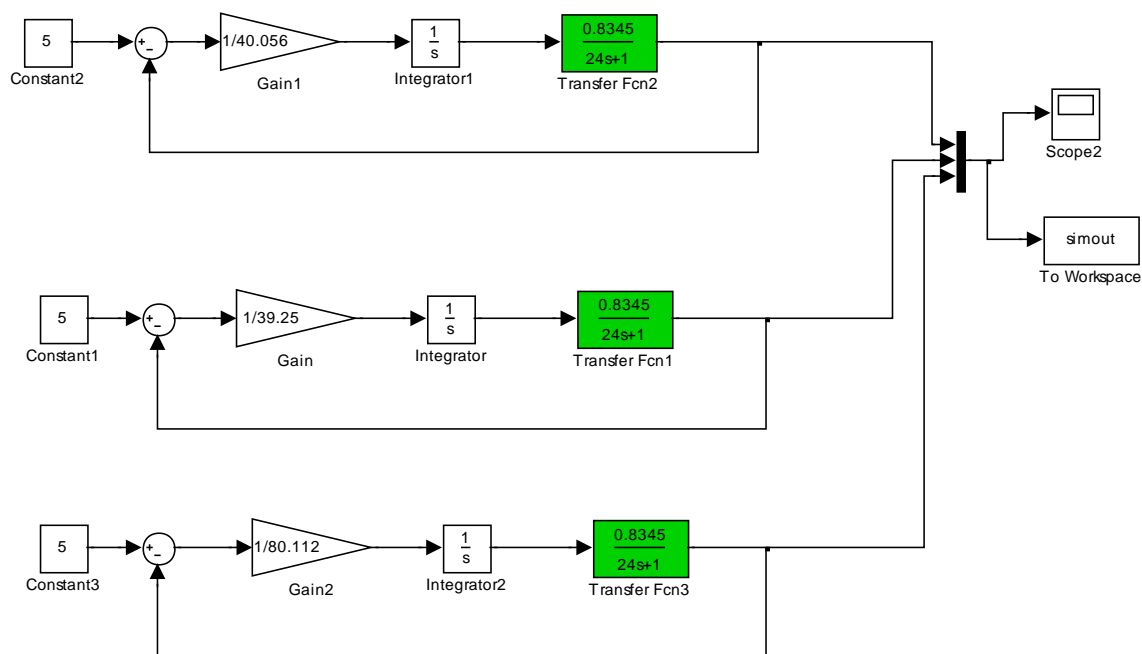
$$T_I = 0,8345 \cdot 24 \cdot 1,4^2$$

$$T_I = 39,25$$

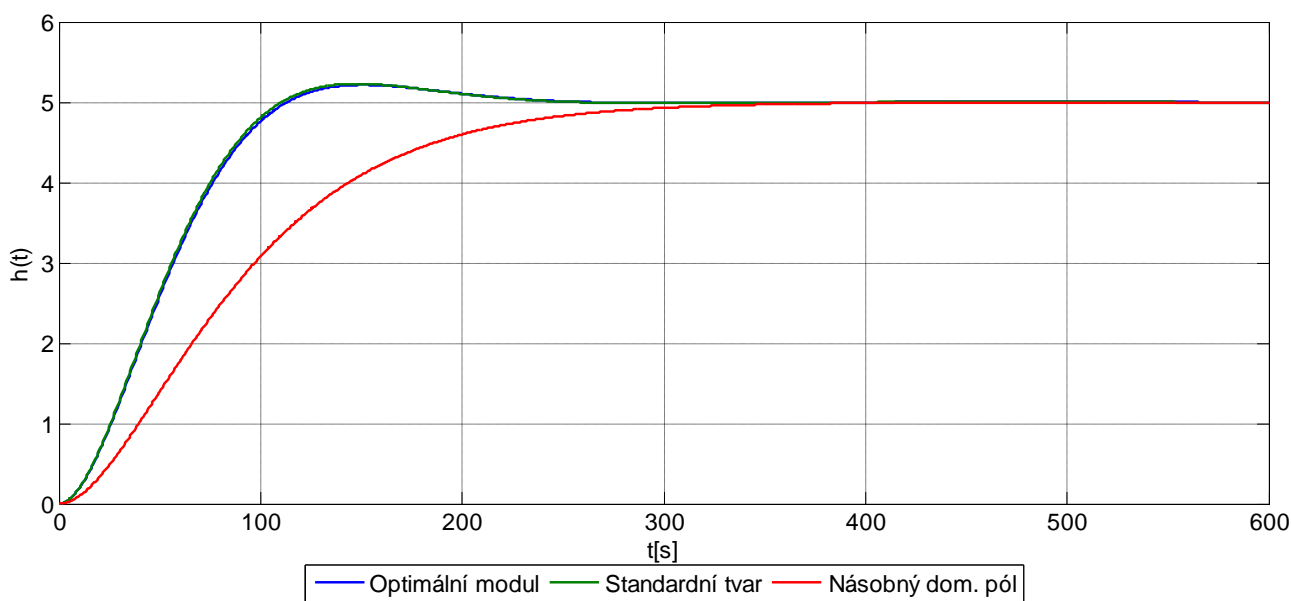
[VÍTEČKOVÁ, M. & VÍTEČEK, A. 2006]

### 4.2.1 Simulační ověření navržených regulátorů druhé nádrže

Správnost navržených regulátorů jsme určili pomocí číslicové simulace, použili jsme simulační program Matlab/Simulink. Schéma simulačního modelu lze vidět na obr. 4.7, a průběh výšky hladiny na obr. 4.8



Obr. 4.7 – Simulační model pro ověření navržených regulátorů druhé nádrže.

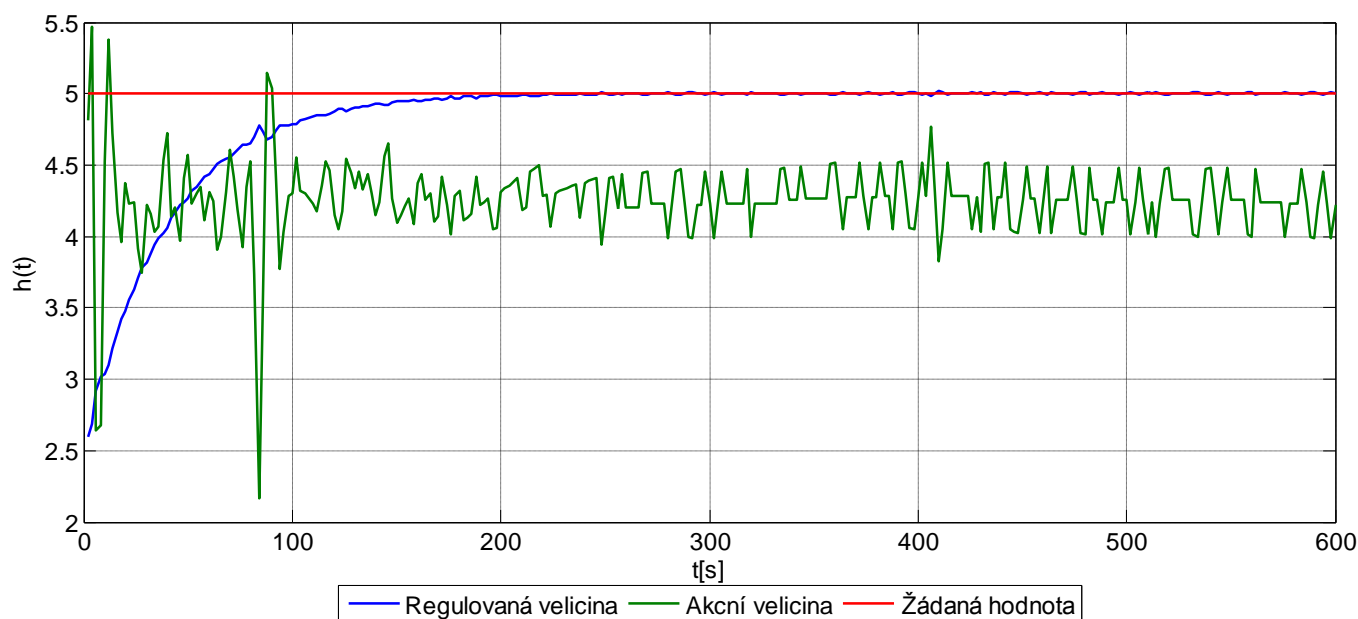


Obr. 4.8 – Průběh regulace výšky hladiny druhé nádrže – simulační ověření.

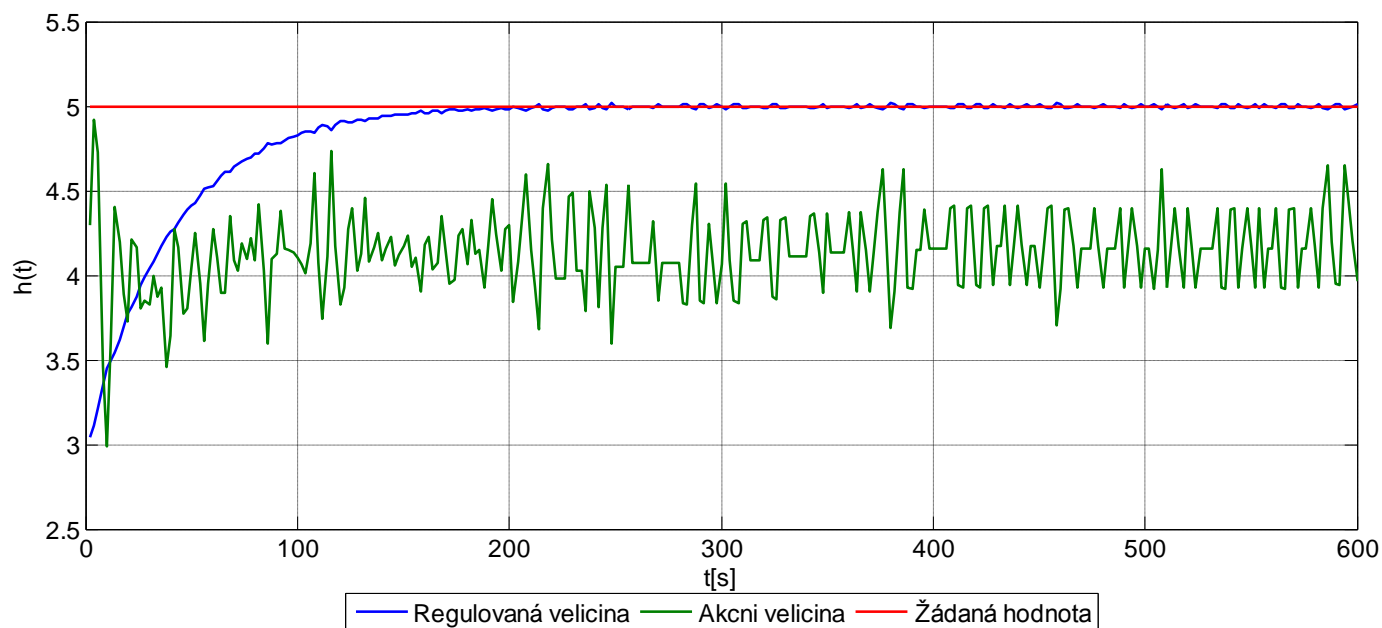


### 4.2.2 *Ověření regulátoru přímo na laboratorním modelu druhé nádrže*

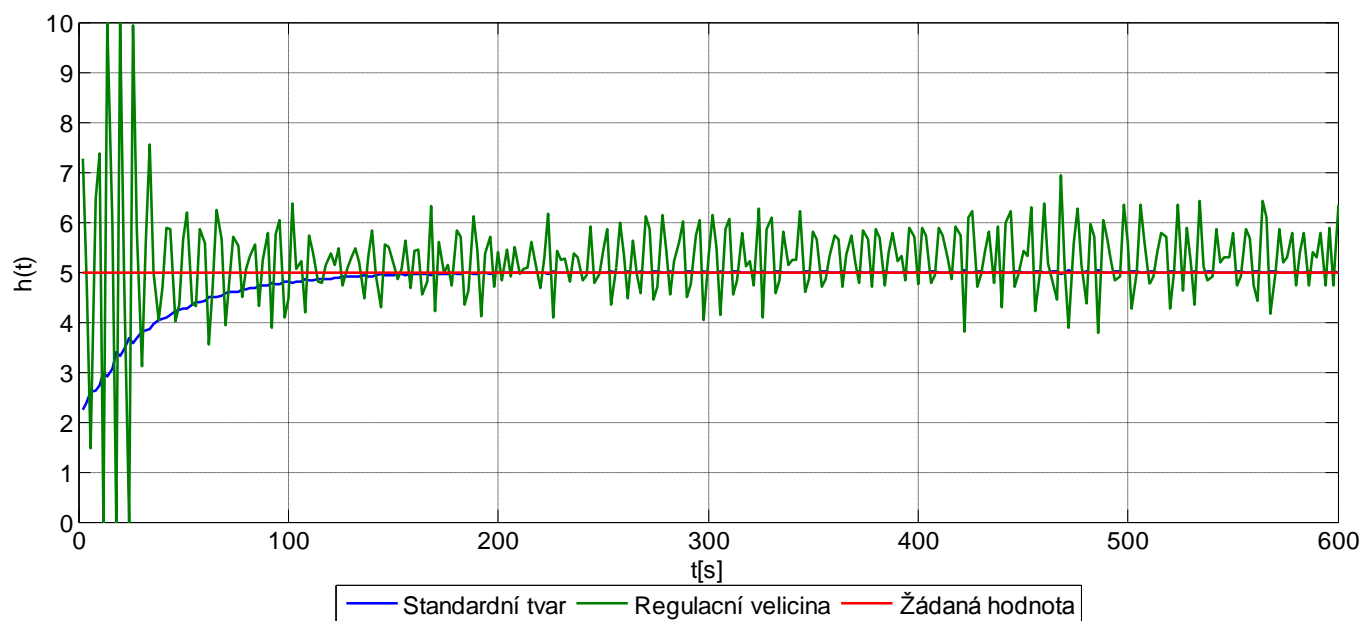
Průběhy regulované veličiny, akční veličiny, žádané hodnoty pro jednotlivé regulátory jsou vidět v grafech na obr. 4.9. Na obr. 4.12 vidíme průběhy výšky hladiny pro všechny 3 hladiny.



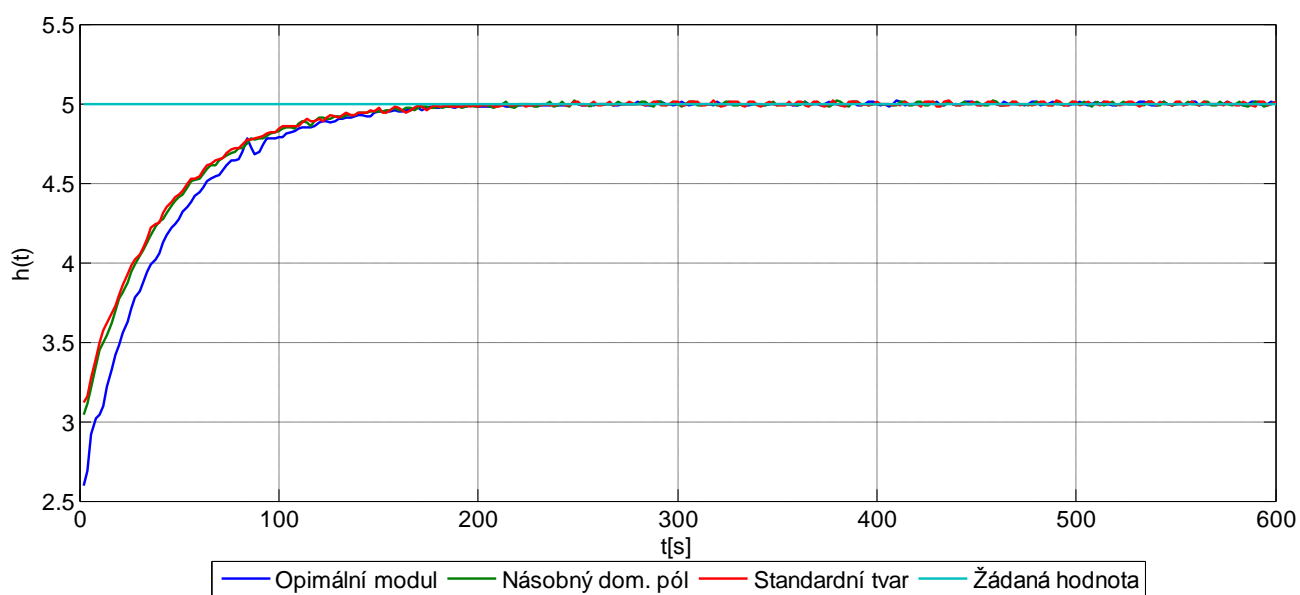
Obr. 4.9 – Regulace výšky hladiny seřízená pomocí optimálního modulu.



Obr. 4.10 – Regulace výšky hladiny seřízená pomocí násobného dominantního pólu.




Obr. 4.11 – Regulace výšky hladiny seřízená pomocí standardního tvaru.



Obr. 4.12 – Průběh regulace výšky hladiny všemi třemi navrženými regulátory.

Na obr 4.12 je vidět průběh regulace výšky hladiny, pomocí všech navržených regulátorů druhé nádrže ověřené na laboratorním modelu.

**Tab. 4.7 – Ověření navržených regulátorů druhé nádrže.**

Metody regulace	Doba regulace $t_r$	Překmit $\chi$	Trvalá regulační odchylka $e_w$ 	Absolutní regulační plocha IAE
Optimální modul	148	0	0	103,8
Násobný dom. pól	180	0	0	86,38
Standardní tvar	198	0	0	83,6

## 5 Závěr

Tato práce spočívá v návržení vhodného typu regulátoru pro regulaci výšky hladiny v jednotlivých nádržích laboratorního modelu hydro-pneumatické soustavy. V úvodu jsem se seznámila s laboratorním modelem, jak po hardwarové tak i po softwarové stránce. Samotný model byl vytvořen na Katedře řízení procesů a výpočetní techniky na Univerzitě v Pardubicích. S počítačem je propojen pomocí sériové linky RS 232 a jednotky CTRL.

Nejprve jsem musela určit matematické modely vybraného laboratorního modelu. K tomu účelu jsem naměřila 5x přechodové charakteristiky pro každou nádrž zvlášť. Z průběhu naměřených přechodových charakteristik jsem určila základní typy aproximace. A to proporcionální soustavou se setrvačností 1. řádu a proporcionální soustavou se setrvačností 1. a 2. řádu a s dopravním zpožděním. Z měřených přechodových charakteristik byly určeny hodnoty konstant přenosu soustavy. Abych zjistila, která aproximace je nejpřesnější, tak jsem vytvořila simulační model všech tří aproximací a výsledky simulace jednotlivých aproximací jsem porovnávala s naměřenými hodnotami.

Na základě tvaru matematického modelu jsem vybrala vhodné metody syntézy regulátoru. Matematický model první nádrže odpovídá proporcionální soustavě se setrvačností 1. řádu s dopravním zpožděním, a proto jsem vybrala následující metody syntézy a to Experimentální metodu a metodu požadovaného modelu. U druhé nádrže odpovídá matematický model proporcionální soustavě se setrvačností 1. řádu bez dopravního zpoždění, a proto jsem vybrala metody syntézy jako optimální modul, násobný dominantní pól a standardní tvary. Vybranými metodami syntézy jsem seřídila konvenční regulátory typu PID pro daný laboratorní model.

Pro první nádrž jsem seřídila P, PI a PID regulátory. Jejich správnost jsem ověřila pomocí číslicové simulace a následně i na laboratorním modelu. P regulátor jsem na reálné soustavě nepoužila, protože při regulaci vznikala trvalá regulační odchylka. Doba regulace je nejkratší u první PI experimentální metody. Překmit a trvalá regulační odchylka je u všech tří metod nulová. Absolutní regulační plocha je nejmenší u požadovaného modelu, tedy u třetí metody.

K regulaci výšky hladiny druhé nádrže jsem použila I regulátor. Rovněž jsem jejich správnost odzkoušela jak simulačně, tak i na laboratorním modelu. Nejkratší doba regulace je u první metody optimálního modulu. Překmit a trvalá regulační odchylky jsou u všech tří metod nulové. Absolutní regulační plocha je nejmenší u standardního tvaru, tedy u třetí metody.

## ***6 Použitá literatura***

- BALÁTEĚ, J. 2003. *Automatické řízení*. Praha: Nakladatelství BEN, 2003, 654 s. ISBN 80-7300-020-2.
- DORF, R. C. & BISHOP, R. H. 1998. *Modern Control Systems*. Addison – Wesley: Harlow England. ISBN 0-201-30864-9.
- DUŠEK, F. 2000. *Matlab a Simulink úvod do používání*, Pardubice, 146 s. ISBN 80-7194-273-1.
- DUŠEK, F. 2000. *Hydraulicko-pneumatická soustava*, Pardubice, 2006, 17 s.
- FARANA, R., SMUTNÝ, L., VÍTEČEK, A. 1999. *Zpracování odborných textů z oblasti automatizace a informatiky*, Ostrava, 68 s. ISBN 80-7078-737-6.
- KLEČKA, R. & MAHDAL, M. 2007. *Identifikace a návrh regulátoru pro Hydraulicko-pneumatickou soustavu*. Ostrava: FS VŠB-TU, 11s
- LOS, J. 2007. *Analýza a syntéza vybraného technologického procesu*. Ostrava: FS VŠB-TU
- NOSKIEVIČ, P. 1999. *Modelování a identifikace systému*. Ostrava: Vydavatelství Montanex a.s. 1999. 276 s. ISBN 80-7225-030-2.
- RIEDL, Z. 2002. *Syntéza řízení vybraného technologického procesu s využitím programu SIPRO a internetové prezentace výsledků*. Ostrava: FS VŠB-TU, 96s
- SLOVÁK, T. 2002. *Využití simulačního programu SIPRO pro identifikaci a prezentaci výsledků v prostředí Internetu*. (Bakalářská práce). Ostrava: FS VŠB-TU, 96s
- ŠATÁNEK, J. 1995. *Identifikace technologických procesů s podporou programového systému MATLAB*. (Diplomová práce). Ostrava: FS VŠB-TU, 51s
- ŠULC, B. 1999. *Teorie automatického řízení s počítačovou podporou*. Praha: ČVUT, 153 s. ISBN 80-01-01974-B.
- ŠULC, B. & VÍTEČKOVÁ, M. 2004. *Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, Praha, 333 s. ISBN 80-01-03007-5.

VÍTEČKOVÁ, M. 2002. *Seřízení regulátoru metodou inverze dynamiky*. Ostrava: FS VŠB-TU Ostrava, 2002, 54 s. ISBN 80-7078-628-0.

VÍTEČKOVÁ, M. 2002 *Seřízení číslicových a analogových regulátorů metodou požadovaného modelu*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 8 s.

VÍTEČKOVÁ, M. & VÍTEČEK, A. 2006. *Základy automatické regulace*. Ostrava: VŠB-TUO 2006. 198 s. ISBN 80-248-1368-9.

.